Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 36, 1. 2025. (15-28)



Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir



Iron&Steel Society of Iran

The Effect of Adding Tungsten Disulfide Nanoplates on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu Nanocomposite

Research Article

Mohammad Alipour[1]

DOI: 10.22067/jmme.2025.85986.1136

1- Introduction

The different aspect of industrial applications of metal matrix composites (MMCs) in aerospace, military, and automotive has been the subject of many studies over the past two decades. The results have shown that compared to monolithic alloys, MMCs have many advantages, including better creep and wear resistance as well as higher specific strength. This study examines the microstructure and mechanical properties of nanocomposites of Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu alloy, tungsten disulfide nanoplates, and aluminum nano-powders prepared by mechanical mixing and casting methods.

2- Experimental

The materials used in this research were 99% pure aluminum powder with an average particle size of 45 micrometers and tungsten disulfide nanoplates with an average thickness of approximately 50-70 nm and an average diameter of 25 micrometers. Aluminum powder and reinforcing slurry were ball milled for 2 hours at a speed of 250 revolutions per minute using a 10:1 ratio of pellets to powder. It is important to mention that the primary particle size of aluminum powder is 45 microns. Ball milling lasts until tungsten disulfide nanosheets are uniformly distributed between aluminum powders. The morphology and size of the powders were examined by SEM after 2 hours of grinding. Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu aluminum alloy ingots are cut into small pieces and then placed in a graphite crucible. The graphite crucible was placed in an electric resistance furnace. Melting of aluminum alloy was done by heating it to ~750°C. The mixture of melt alloy and nano-particles was stirred with a mechanical stirrer at a rotation speed of 1500 rpm for 10 minutes, then stirring was continued with the help of an ultrasonic device for 5 minutes so that the nanoplates are evenly distributed and homogenized in the melt. Nanocomposite samples with 0.1, 0.3, 0.7 and 1 weight percentages of tungsten disulfide nanosheets as reinforcement have been prepared. After the successful addition of nano-reinforcement particles and uniform mixing, the composite melt was poured into a permanent mold prepared according to ASTM B108 standard. Before the tensile test, T6 heat treatment was applied to the castings containing 0.7% by weight of tungsten disulfide nanosheets. Finally, the samples were subjected to T6 heat treatment including heating to 460°C for 8 hours, quenching in water (25°C) and aging at 120°C for 24 hours. For structural studies, an optical microscope equipped with an image processing system (Clemex Vision Pro. Ver.3.5.025) and a Cam Scan MV2300 scanning electron microscope equipped with an energy dispersive spectroscopy (EDX) detector were used. The cut sections were polished and then etched by chlorine etching solution (2 mL H, 3 mL HCl, 5 mL HNO_3, and 190 mL H_2O) to reveal the structure. The average grain size of the samples was measured according to the ASTM: E112 standard. The tensile test was performed at ambient temperature by a SANTAM 150 tensile machine with a strain rate of s-10.003. The dimensions of the tensile test specimens were based on the ASTM-E8-04 standard. Figure 3 shows the size and configuration of the tensile specimen. 4 tensile test samples were performed and the average of these 4 samples was reported.

3- Results and Discussion

The morphology and size of the powders were examined by SEM after 2 hours of grinding. The initial particle size of aluminum powder was 45 microns. However, after 2 h of milling, the particle size of the powders is reduced by the milling process, which can lead to better dissolution and less agglomeration during the casting process. In addition, according to SEM results, the morphology of aluminum powders changes to flakes after grinding. Besides, tungsten disulfide nanosheets are uniformly distributed between aluminum powders. Figure 1 shows the SEM image and elemental analysis of the initial prototype sample, contains 75% aluminum powder and 25% tungsten disulfide nanoplates, which have been pressed after grinding before being added to the melt so that they can be added to the melt more easily. As seen in Figure 1, due to the formation of tungsten disulfide sheets

*Manuscript received November 30, 2023, Revised January 24, 2024, Accepted April 13, 2023.

[1] Corresponding author: Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran **Email***:* alipourmo@tabrizu.ac.ir

around the aluminum powder in the first stage of grinding, a uniform distribution of tungsten disulfide sheets on the aluminum powder was obtained after the grinding process. In fact, it is believed that the formation of tungsten disulfide sheets can be beneficial in reducing the high tendency of nanoparticles to agglomerate during the milling process.

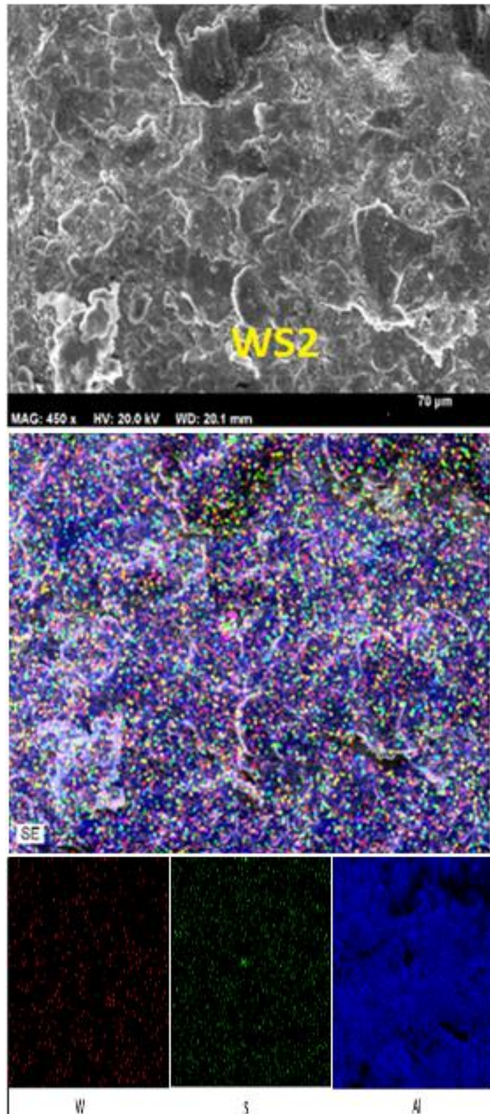


Figure 1- SEM image and elemental analysis of the initial prototype sample containing 75% aluminum powder and 25% tungsten disulfide nanoplates.

Figure 2 shows the strength results of nanocomposite samples. Tensile strength increases with increasing the weight percentage of tungsten disulfide nanosheets. In general, by adding tungsten disulfide nanoplates up to 0.7% by weight, the strength of the nanocomposite increases, but adding more nanoplates will decrease the strength of the nanocomposite. The optimal amount of tungsten disulfide nanoplates according to grain size, mechanical properties, and optical and electronic images is 0.7% by weight.

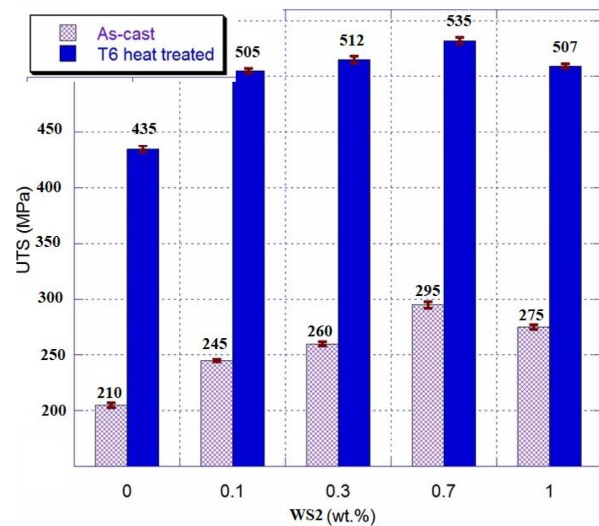


Figure 8- Results of strength properties of nanocomposites containing tungsten disulfide nanoplates.

4- Conclusions

The present research work shows that the casting method using mechanical stirrer and ultrasonic waves has been very effective for improving the mechanical properties of Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu aluminum base alloy composites reinforced with tungsten disulfide nanoplates. Ultrasonic casting helps in uniform distribution of tungsten disulfide nanosheets in aluminum substrate. Ultrasonic waves, when propagating in the base alloy melt, break the clusters of nanoplates, which leads to uniform dispersion of the nanoplates and hence improved mechanical properties. However, when the weight percentage of tungsten disulfide nanosheets reaches more than 0.7% by weight. Accumulation of tungsten disulfide nanosheets at the grain boundary causes brittleness, porosity, less surface bonding, and as a result, a decrease in mechanical properties. The best mechanical properties were obtained for the nanocomposite sample containing 0.7% of tungsten disulfide nanoplates. The mechanical properties of this sample are 535 MPa after aging treatment, which has increased by 155% compared to the base sample before aging treatment.



مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



تاثیر افزودن نانو صفحات دی سولفید تنگستن بر ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ریختگی Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور(۱)

DOI : 10.22067/jmme.2025.85986.1136

چکیده *در این تحقیق تاثیر افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن بر ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت آلیاژ آلومینیوم Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu تولید شده به روش متالورژی پودر و ریخته گری بررسی شده است. در این تحقیق ابتدا پیش سازه حاوی نانوصفحات دی سولفید تنگستن و پودر خالص آلومینیم ساخته شده و در ادامه این پیش سازه به مذاب اضافه می شود. وجود نانوصفحات دی سولفید تنگستن پراکنده با سطح ویژه بالا به طور قابل توجهی استحکام نانوکامپوزیت را افزایش می دهد. مطالعات ریزساختاری آلیاژ نشان داد که افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن باعث کاهش اندازه دانه می شود. بررسی‌های بیشتر روی آزمایش کششی نشان داد که افزودن نانوصفحات استحکام کششی نهایی را افزایش می‌دهد. عملیات حرارتی T6استحکام نهایی نمونه های نانوکامپوزیت را بطور چمگیری افزایش می دهد. با افزودن مقدار نانوصفحات بالاتر از ۰٫۷ درصد وزنی، وجود کلوخه نانوصفحه دی سولفید تنگستن در مرزهای دانه به عنوان مسیر مطلوب برای رشد ترک ایجاد می شود. نانوکامپوزیت حاوی ۰٫۷ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن بعد از عملیات حرارتی پیرسختی استحکام کششی Mpa ۵۳۵ را نشان می دهد.*

واژه های کلیدی کامپوزیت های زمینه فلزی(MMCs)، خواص مکانیکی، ریزساختارها; فرآیند پودی، عملیات آلتراسونیک.

The Effect of Adding Tungsten Disulfide Nanoplates on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu Nanocomposite

Mohammad Alipour

Abstract *In this research, the effect of adding tungsten disulfide nanosheets on the microstructure and mechanical properties of Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu aluminum alloy nanocomposite produced by powder metallurgy and casting method has been investigated. In this research, first, a pre-structure containing tungsten disulfide nanoplates and pure aluminum powder is made, and then this pre-structure is added to the melt. The presence of dispersed tungsten disulfide nanosheets with high specific surface area significantly increases the strength of the nanocomposite. Microstructural studies of the alloy showed that the addition of tungsten disulfide nanosheets reduces the grain size. Further investigations on the tensile test showed that the addition of nanosheets increased the ultimate tensile strength. T6 heat treatment increases the final strength of nanocomposite samples. By adding nanoplates above 0.7% by weight, the presence of tungsten disulfide nanoplate clumps in the grain boundaries is created as a favorable path for crack growth. The nanocomposite containing 0.7% of tungsten disulfide nanoplates shows a tensile strength of 535 Mpa after heat treatment.*

Keywords Metal matrix composites (MMCs); Mechanical properties, Microstructures; Powder processing, Ultrasonic treatment.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱/۲۴ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

مقدمه

استفاده از کامپوزیت های زمینه فلزی (MMCs) در صنایعی مانند هوانوردی، نظامی و خودرو موضوع بسیاری از مطالعات در دو دهه گذشته بوده است [1-4]. نتایج نشان داده است که در مقایسه با آلیاژهای یکپارچه، MMCها مزایای زیادی از جمله مقاومت بهتر در برابر خزش و سایش و همچنین استحکام ویژه بالاتر دارند [4-7]. آلیاژهای نانوبلور (NC) و نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMNCs) بر پایه فلزات سبک‌وزن مانند Al و Mg در حال حاضر به‌شدت مورد بررسی قرار می‌گیرند به این امید که استحکام های قابل مقایسه با فلزات بسیار متراکم‌تر تولید شوند [8-11]. شکل پذیری کم MMC ها عموما به دلیل وجود درصد بالایی از فاز تقویت کننده درشت و شکننده در زمینه است. نشان داده شده است که خواص نانوکامپوزیت‌ها را می توان با ادغام حتی مقادیر کمی از نانوذرات تا حد زیادی بهبود بخشید. وجود نانوتقویت‌کننده‌های سرامیکی مانند نانوذرات SiC (SiC np) در زمینه همچنین خواص مکانیکی دمای بالا کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشد [12-16]. در میان تقویت‌کننده‌های مختلف، مواد تازه در حال ظهور، نانوصفحات، دارای ویژگی‌های مطلوب بسیاری مانند هدایت حرارتی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، ظرفیت میرایی بالا و خاصیت خود روان‌کنندگی خوب هستند [17]. با این حال، دی سولفید تنگستن به دلیل خواص برتر با سطح ویژه بالا، یک نامزد امیدوارکننده ظاهر شده است. در همین حال، مطالعات مربوط به اضافه کردن دی سولفید تنگستن در کامپوزیت های زمینه فلزی (MMCs) به دلیل مشکلات بیشتر در پراکندگی دی سولفید تنگستن در زمینه کمیاب است [18-22]. بسیاری از محققان بر روی استفاده از روش‌های نوآورانه برای ترکیب نانوذرات در آلومینیوم مذاب، ساختن MMNC با پراکندگی مناسب و اجتناب از تجمع نانوذرات تمرکز کرده‌اند. آسیاب نانو ذرات با پودرهای فلزی مانند آلومینیوم و اختلاط مکانیکی و روش های ریخته گری به کمک آلتراسونیک از مهم ترین روش هایی است که در این زمینه ارائه شده است.

این مطالعه به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های آلیاژ آلومینیوم Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu با استفاده از روش متالورژی پودر دی سولفید تنگستن با پودرهای آلومینیوم و روش‌های اختلاط و ریخته‌گری مکانیکی می‌پردازد. در این تحقیق تمرکز بر روی اضافه کردن نانوصفحات دی سولفید تنگستن به مذاب آلیاژ سری ۷۰۰۰ آلومیینیوم می باشد که قبلا در هیچ تحقیقی بر روی این سری از آلیاژها کار تحقیقاتی انجام نشده است.همچنین برای پخش بهتر نانوذرات داخل مذاب از پیش سازه پودر آلومینیوم و نانوصفحات دی سولفید تنگستن استفاده شده است.

روش تحقیق

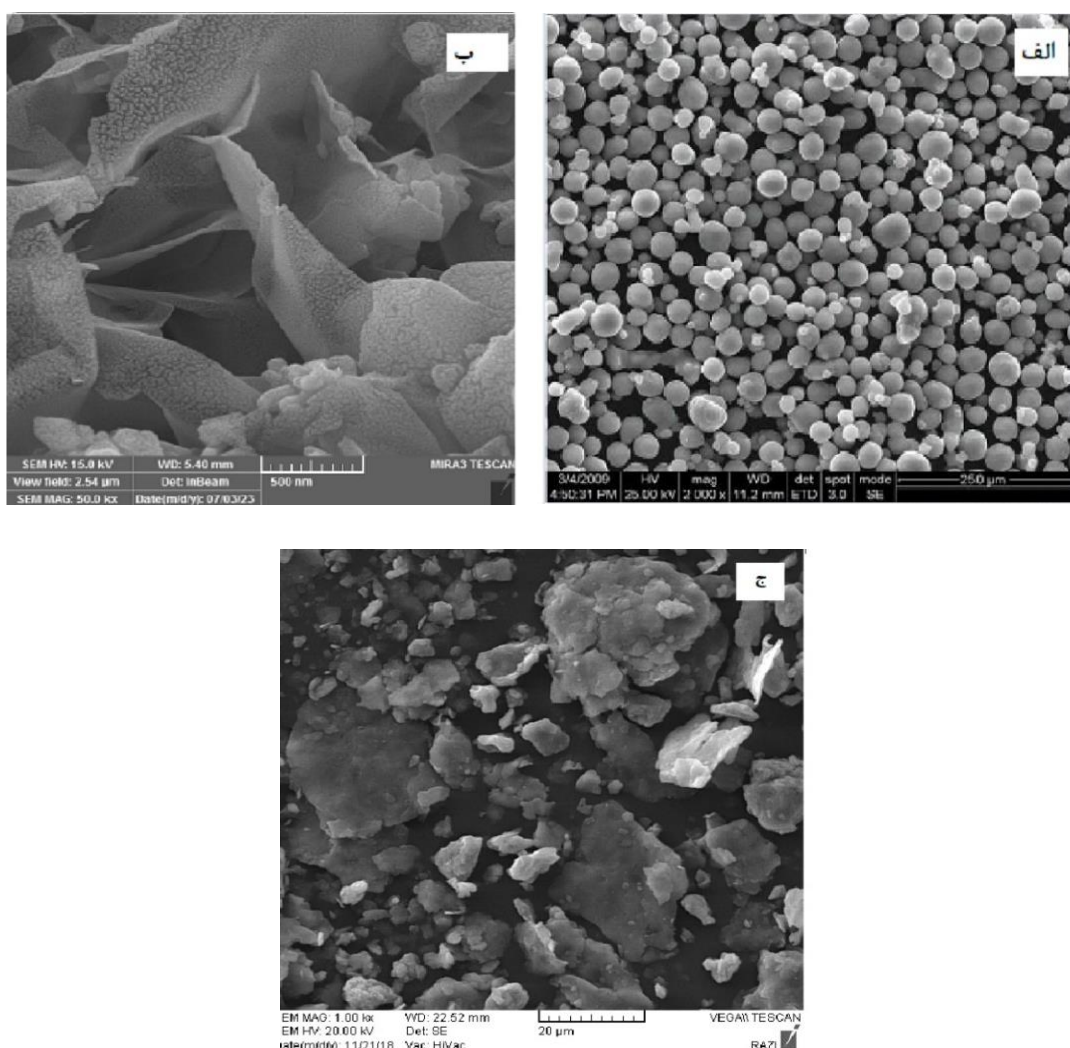
مواد مورد استفاده در این تحقیق پودر آلومینیوم خالص ۹۹ درصد با اندازه ذرات متوسط ۴۵ میکرومتر و نانوصفحات دی سولفید تنگستن با ضخامت متوسط تقریبا ۵۰ الی ۷۰ نانومتر و قطر متوسط ۲۵ میکرومتر بودند. شکل (۱) میکروگراف های SEM نانوصفحات دی سولفید تنگستن و پودر آلومینیوم خالص نشان می دهد. برای تولید پودرهای آلومینوم حاوی نانوصفحات، تقویت‌کننده‌ها (نانوصفحات دی سولفید تنگستن) در اتانول بی‌آب ۹۹٫۵ درصد توسط امواج فراصوت پراکنده شدند.

پودر آلومینیوم و دوغاب تقویت‌کننده به مدت ۲ ساعت با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه با استفاده از نسبت گلوله به پودر ۱۰:۱ به آسیاب گلوله‌ای اضافه شدند. ذکر این نکته ضروری است که اندازه ذرات اولیه پودر آلومینیوم ۴۵ میکرون است. نانوصفحات دی سولفید تنگستن به‌طور یکنواخت بین پودرهای آلومینیومی توزیع می‌شوند. مورفولوژی و اندازه پودرها پس از ۲ ساعت آسیاب توسط SEM بررسی شد. شکل (۱- ج) تصویر SEM پودرهای Al-25% ws2 با اشکال پوسته پوسته را پس از ۲ ساعت آسیاب نشان می دهد.

شمش‌های آلیاژ آلومینیوم Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu به قطعات کوچک بریده شده و سپس در یک بوته گرافیتی قرار داده می‌شوند. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu مورد مطالعه در این کار در جدول (۱) آورده شده است. بوته گرافیتی در یک کوره مقاومت الکتریکی قرار گرفت. ذوب آلیاژ آلومینیوم با حرارت دادن آن تا دمای ~ ۷۵۰ درجه سانتیگراد انجام شد. سپس با همزن مکانیکی با سرعت چرخش ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه مذاب آلیاژ به هم زده شد سپس در ادامه به کمک دستگاه آلتراسونیک به مدت ۵ دقیقه به همزدن ادامه داده شد تا نانوصفحات بطور یکنواخت داخل مذاب پخش و همگن شوند. کوره، همزن مکانیکی و دستگاه آلتراسونیک مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. نمونه های

نانوکامپوزیت با درصد وزنی ۰،۱، ۰،۳، ۰،۷ و ۱ تقویت کننده نانوصفحات دی سولفید تنگستن تهیه شده اند. پس از افزودن موفقیت آمیز ذرات تقویت کننده نانو و اختلاط یکنواخت، مذاب کامپوزیت در قالب دائمی تهیه شده بر اساس استاندارد ASTM B108 ریخته شد (شکل ۳).

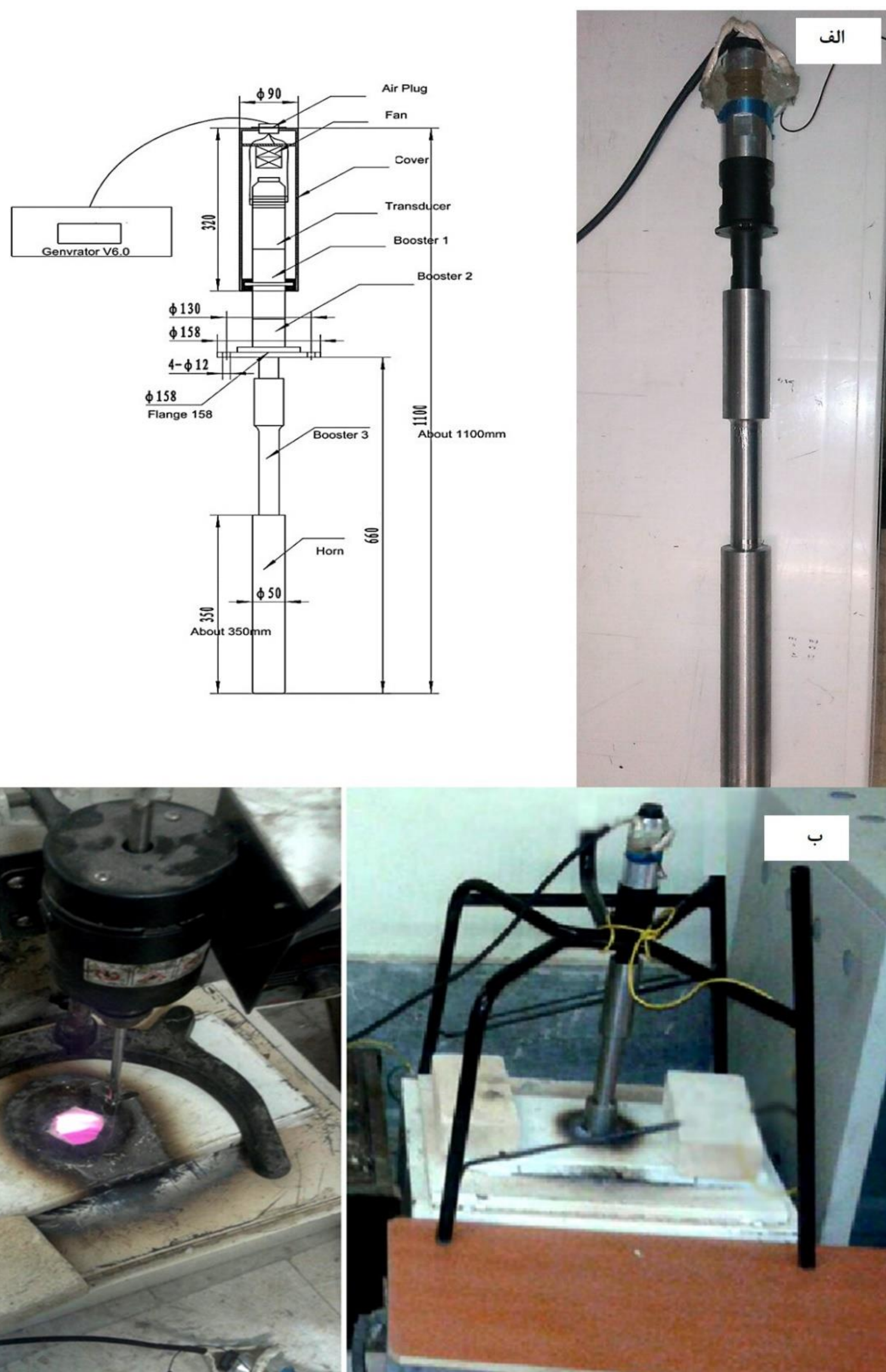
قبل از آزمایش کشش، عملیات حرارتی T6 بر روی قطعات ریخته‌گری حاوی مقدار بهینه نانوصفحات دی سولفید تنگستن، یعنی ۰،۷ درصد وزنی و نمونه‌های ریخته‌شده اعمال شد. برای این منظور، نمونه ها تحت عملیات حرارتی T6 شامل حرارت دادن تا دمای ۴۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ ساعت، کوئنچ در آب (۲۵ درجه سانتیگراد) و پیرسازی در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. برای مطالعات ساختاری از میکروسکوپ نوری مجهز به سیستم پردازش تصویر (Clemex Vision Pro. Ver.3.5.025) و هم میکروسکوپ الکترونی روبشی Cam Scan MV2300، مجهز به آشکارساز طیف‌سنجی پراکنش انرژی (EDX) استفاده شد. بخش های بریده شده صیقل داده شده و سپس توسط محلول اچ کلر (۲ میلی لیتر H، 3 میلی لیتر هیدروکلراید، ۵ میلی لیتر HNO_3 و ۱۹۰ میلی لیتر H_2O) اچ شده تا ساختار نمایان شود. میانگین دانه بندی نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM:E112 اندازه گیری شد. تست کشش در دمای محیط توسط یک ماشین کششی SANTAM 150 با نرخ کرنش s-10.003 انجام شد. ابعاد نمونه های آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8-04 بود و شکل (۳) اندازه و پیکربندی نمونه کششی را نشان می دهد. برای هر درصد ۴ نمونه آزمون کشش انجام شده و میانگین این ۴ نمونه گزارش شد.



شکل ۱ (الف) پودر آلومینوم خالص، (ب) نانوصفحات WS2، (ج) پودر Al-25% ws2 بعد از ۲ ساعت آسیاکاری مکانیکی

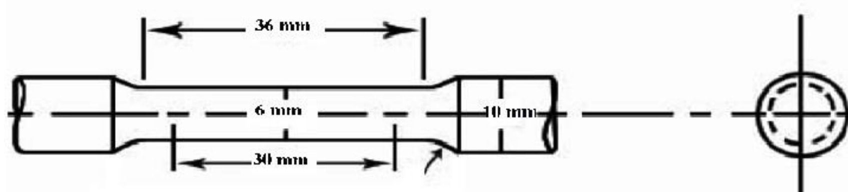
جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu

Substance	Al	Zn	Mg	Cu
Wt.%	Bal	10	3.5	2.5



شکل ۲ (الف) پروب دستگاه آلتراسونیک، (ب) کوره مقاومتی و همزن مکانیکی





شکل ۳ قالب فلزی و ابعاد نمونه کشش

نتایج و بحث

مطالعات ریزساختاری

ذکر این نکته ضروری است که اندازه ذرات اولیه پودر آلومینیوم ۴۵ میکرون بود. با این حال، پس از ۲ ساعت آسیاب، اندازه ذرات پودرها با فرآیند آسیاب کاهش می‌یابد، که می‌تواند انحلال بهتر و تجمع کمتری را در طی فرآیند ریخته‌گری بهمراه داشته باشد. علاوه بر این، مورفولوژی پودرهای آلومینیوم پس از آسیاب به شکل پوسته پوسته تغییر می کند. نانوصفحات دی سولفید تنگستن به طور یکنواخت بین پودرهای آلومینیومی توزیع می‌شوند. مورفولوژی و اندازه پودرها پس از ۲ ساعت آسیاب توسط SEM بررسی شد. شکل (۱- ج) تصاویر SEM پودرهای Al-25% WS2را پس از ۲ ساعت آسیاب نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است پودرهای کروی بصورت لایه ای و فلسی شکل درآمده اند.

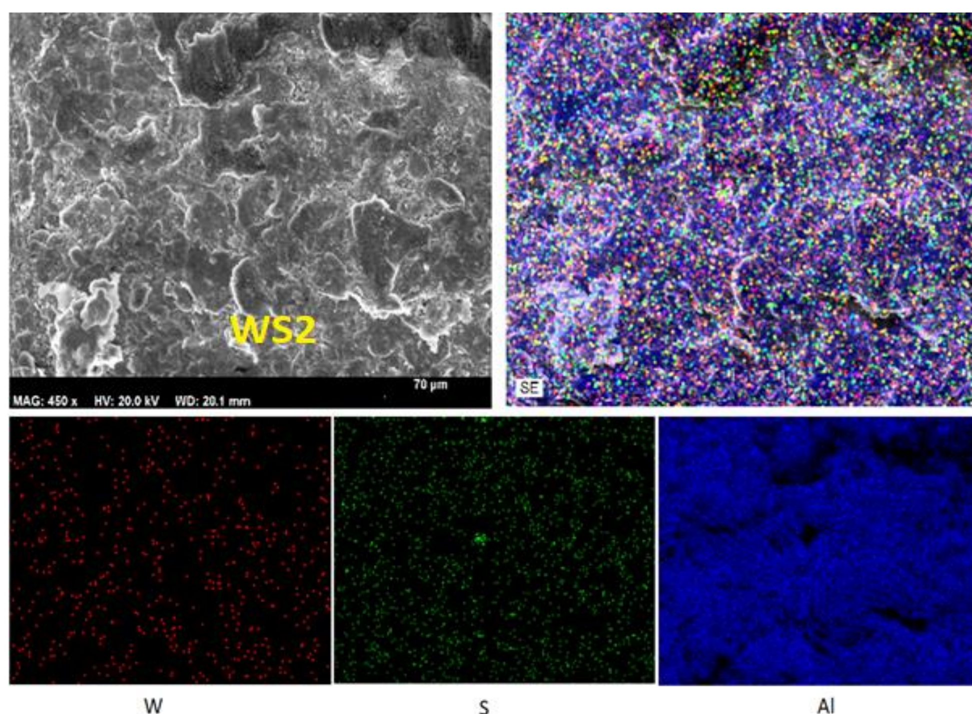
اساسا انحلال پودرهای کوچک در مذاب راحت تر از پودرهای کلوخه ای بزرگتر است. دو مکانیزم مهم مسئول پراکندگی نانوذرات قبل از انجماد هستند. ابتدا انحلال پودرهای آلومینیوم در حین تزریق پودرها به مذاب. در واقع پودرهای آلومینیوم به عنوان حامل ذرات نانوئی به مذاب عمل می کنند و آنها را از هرگونه تماس با سطح مذاب و لایه رویی مذاب محافظت می کنند و پس از انحلال آنها، نانوذرات در زمینه مذاب آزاد می شوند. دوم، قدرت ارتعاش امواج آلتراسونیک باعث می شود که ذرات کلوخه ای ازهم باز شده و نانوصفحات داخل مذاب بصورت یکنواخت پراکنده شوند. در واقع، پیش‌بینی می‌شود که پودرهای آلومینیومی که در قسمت داخلی یک نانوذرات کلوخه ای قرار دارند، به عنوان یک چسبنده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد عمل می‌کنند تا از جداسازی و انتشار ذرات جلوگیری کنند، که تنها امواج آلتراسونیک می‌تواند این نانوذرات را در حین هم زدن جدا کند [27].

شکل (۴) تصویر SEM و آنالیز عنصری از نمونه پیش سازه اولیه که حاوی ۷۵ درصد پودر آلومینوم و ۲۵ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن می باشد که پس از آسیاب قبل از اضافه شدن به داخل مذاب پرس شده اند تا راحت تر به داخل مذاب اضافه شوند. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود، به دلیل تشکیل ورقه های دی سولفید تنگستن در اطراف پودر آلومینیوم در مرحله اول آسیاب، توزیع یکنواخت ورقه های دی سولفید تنگستن بر روی پودر آلومینیوم پس از فرآیند آسیاب به دست آمد. در واقع، اعتقاد بر این است که تشکیل ورقه های دی سولفید

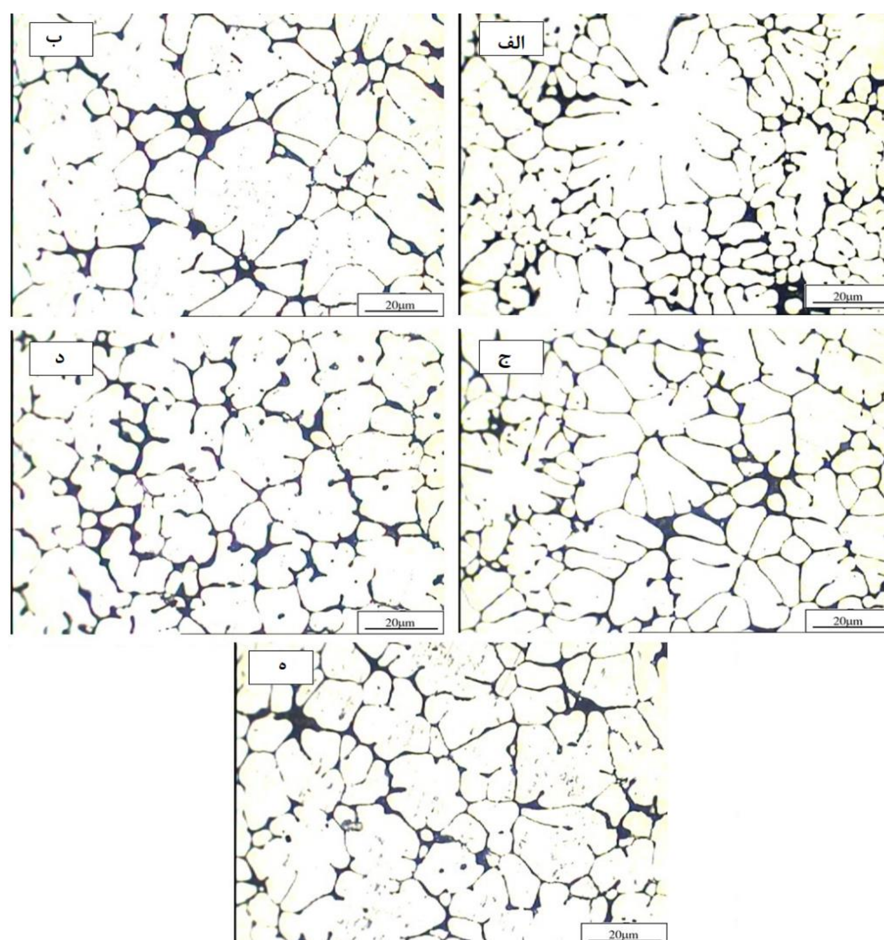
تنگستن می تواند یک استراتژی خوب برای کاهش تمایل بالای نانوذرات برای تجمع در طی فرآیند آسیاب باشد.

ریزساختارهای آلیاژ Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu پس از ریخته گری و افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن با درصدهای مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۵) تغییر مورفولوژی دندریت Al-10Zn-3.5Mg-2.5 را پس از افزودن دی سولفید تنگستن نشان می دهد. ریزساختارهای میکروسکوپ نوری بصورت رزی مانند (مثل شکل گل رز) متشکل از محلول جامد دانه های آلفا اولیه که توسط فازهای ثانویه بین دندریتی احاطه شده است را نشان می دهد. در مقایسه با نمونه های اضافه شده با دی سولفید تنگستن، نمونه های اصلاح نشده مورفولوژی درشت تری را نشان دادند، از شکل (۵)، می شود استنباط کرد که دی سولفید تنگستن و ریخته گری گردابی تعداد مرزهای دانه را افزایش می دهد و بنابراین توزیع همگن تری از فازهای بین فلزی را بهمراه خواهد داشت. رایج ترین فاز مشاهده شده در ریزساختار ریختگی در آلیاژهای Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu فاز(θ) Al_2Cu و فاز یوتکتیک MgZn2 است [26]. در جدول (۲) اندازه دانه نمونه های مختلف نشان داده شده است که با افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن اندازه دانه کاهش پیدا می کند. شکل (۶) نتایج حاصل از آنالیز EDS از نمونه حاوی ۰٫۷ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن را نشان می دهد. شکل (۶) توزیع نانوصفحات دی سولفید تنگستن را در ریزساختار نمونه نشان می دهد. همانطور که از شکل (۶) مشخص است می توان گفت که نانوذرات بعد از استفاده از همزن مکانیکی و در ادامه امواج آلتراسونیک، کاملا در زمینه پخش شده اند که همین پراکندگی و عدم وجود کلوخه نانوصفحه در داخل ریزساختار باعث بالا بودن خواص مکانیکی این نمونه شئده است. ذرات تقویت کننده تقریبا به طور یکنواخت در زمینه Al توزیع شده اند. محتوای نانوصفحات دی سولفید تنگستن ۰٫۷ درصد وزنی دارد. با افزایش بیشتر محتوای نانوصفحات دی سولفید تنگستن، تجمع و کلوخه ای شدن نانوصفحات دی سولفید تنگستن رخ می‌دهد. تقویت این مواد به دلیل انسداد حرکت نابجایی توسط نانوصفحات دی سولفید تنگستن است. با افزایش محتوای نانوصفحات دی سولفید تنگستن – این نانوصفحات مرزهای دانه را قفل کرده و باعث اصلاح دانه‌ها می‌شوند، همچنین نانوصفحات باعث انحراف ترک‌ها شده و مسیر رشد ترک را طولانی تر می کنند و باعث افزایش استحکام در نانوکامپوزیت می‌شوند. شایان ذکر است که با افزودن نانوصفحات، نانوصفحات باعث کاهش اندازه دانه نانوکامپوزیت شده و با مکانیزم هال–پچ باعث افزایش استحکام خواهند شد. همچنین نانوصفحات در مقابل حرکت نابجایی ها مقاومت کرده و مانع تغییر شکل بیشتر خواهند شد و همچنین نانوصفحات از تجمع نابجایی ها و ایجاد مراکز تنش و در نهایت جوانه زنی ترک نیز جلوگیری کرده و مانع ایجاد ترک و اشاعه ترک در داخل نمونه خواهند شد. در ادامه در صورت ایجاد ترک در ساختار و اشاعه ترک، نانوصفحات در مقابل اشاعه بیشتر ترک مانع ایجاد کرده و ترک برای ادامه مسیر خود مجبور به دور زدن نانصفحه خواهد شد که این خود به نیرو بیشتری نیاز دارد که خود عامل افزایش استحکام در این نوع نانوکامپوزیت خواهد بود. هنگامی که درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن بیش از ۰٫۷ باشد، مرزهای دانه به اشباع رسیده و اثر اصلاح دانه کاهش می یابد. تجمع نانوصفحات دی سولفید تنگستن روی مرز دانه‌ها باعث شکنندگی مرز دانه، تخلخل و در نتیجه استحکام ضعیف‌تر می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که توزیع ذرات در زمینه آلومینیوم پس از عملیات حرارتی T6 خوب بوده و این شرایط باعث استحکام بالا در نمونه ها پس از عملیات حرارتی T6 می شود. با اعمال عملیات حرارتی T6 رسوبات پیوسته ای که در زمینه بوده اند بصورت ریز و یکنواخت در زمینه آلیاژ پخش شده و باعث افزایش استحکام آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت خواهند شد. در شکل (۷) تصاویر SEM از ریزساختار نمونه نانوکامپوزیت حاوی ۰٫۷ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن قبل و بعد از عملیات حرارتی T6 نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است بعد از عملیات حرارتی T6 رسوبات پیوسته در ساختار از بین رفته و در داخل زمینه بصورت رسوبات مجزا تشکیل شده اند که همین عامل افزایش استحکام نانوکامپوزیت بعد از عملیات حرارتی T6 می باشد.



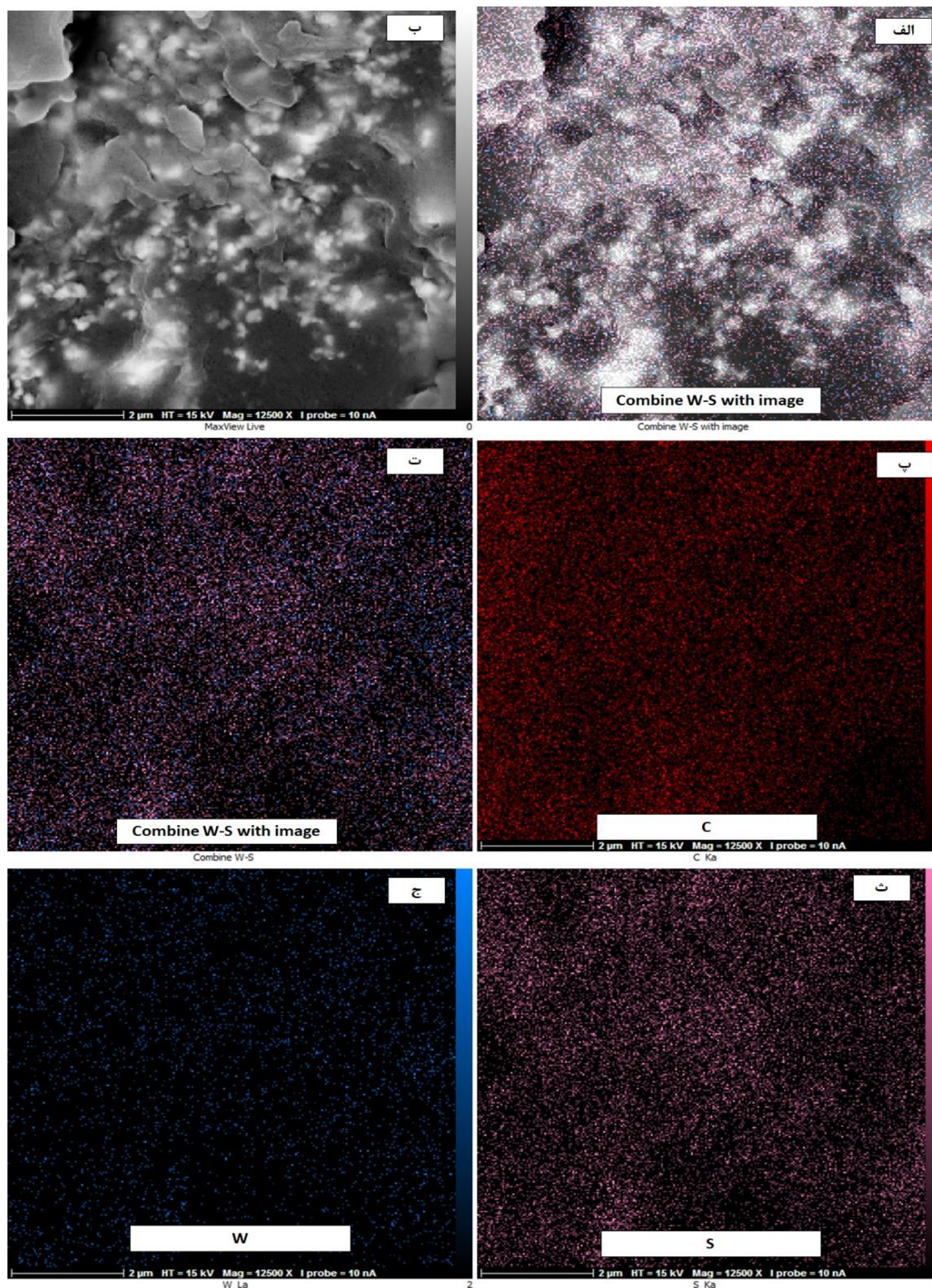
شکل ۴ تصویر SEM و آنالیز عنصری از نمونه پیش سازه اولیه که حاوی ۷۵ درصد پودر آلومینوم و ۲۵ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن



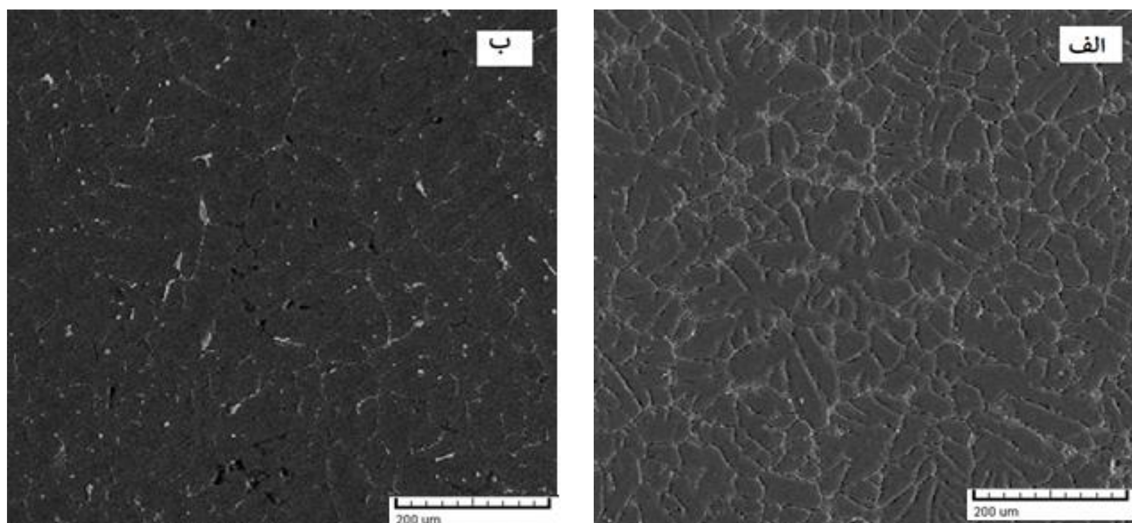
شکل ۵ ریزساختار نمونه های اصلاح شده با: (الف) 0 wt.% WS2، (ب) 0.1 wt.% WS2، (ج) 0.3 wt.% WS2، (د) 0.7 wt.% WS2 و (ه) 1 wt.% WS2

جدول ۲ اندازه دانه متوسط نمونه های نانوکامپوزیت

Sample	Grain Size (μm)
0 wt.% WS2	63
0.1 wt.% WS2	50
0.3 wt.% WS2	42
0.7 wt.% WS2	28
1 wt.% WS2	30



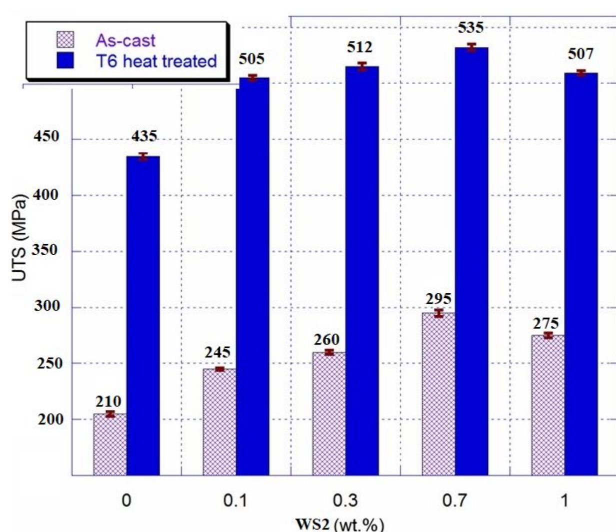
شکل ۶ نتایج آنالیز EDS از نمونه نانوکامپوزیت حاوی ۰,۷ درصدزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن و نحوه پراکندگی نانوصفحات در زمینه نانوکامپوزیت



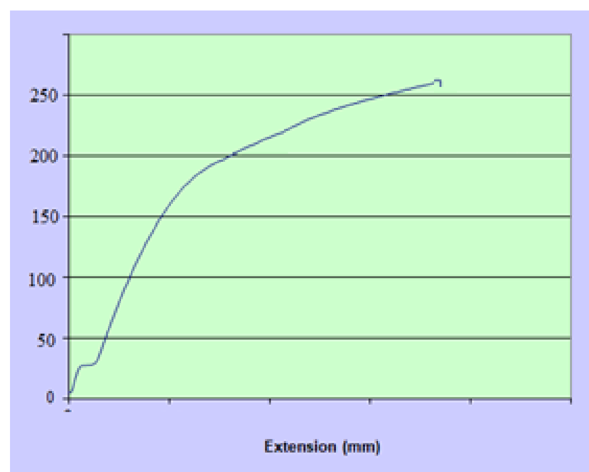
شکل ۷ نانوکامپوزیت آلیاژ Al-10Zn-3.5Mg-2.5 حاوی ۰٫۷ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن: (الف) قبل از عملیات حرارتی T6، (ب) بعد از عملیات حرارتی T6

استحکام کششی

شکل (۸) نتایج استحکام نمونه های نانوکامپوزیت را نشان می دهد. استحکام کششی با افزایش درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن افزایش می یابد. م.تابنده خورشید و همکاران [32] کامپوزیت های زمینه آلومینیومی مشخص شده تقویت شده توسط دو اندازه ذرات آلومینا (۳۵ نانومتر و ۰٫۳ میکرومتر) با آسیاب سایشی مرطوب و فرآیندهای اکستروژن رو به جلو گرم تهیه کردند. مشخص شده است که با افزایش محتوای نانو ذرات، سختی و استحکام کامپوزیت ها ابتدا افزایش می یابد و زمانی که مقدار نانوذرات از ۰٫۴ درصد وزنی فراتر می رود، کاهش می یابد. مظاهری و همکاران [33]. روی توسعه کامپوزیت های A356/nano-Al2O3 با کارایی بالا کار کردند. مشخص شد که وجود تقویت کننده نانو-Al2O3 منجر به بهبود قابل توجهی در سختی، استحکام تسلیم و UTS شد. اس. مولا و همکاران [34] در تحقیقات خود به بررسی ساختار نانو کامپوزیت تقویت شده با آلومینا تحت ریخته گری آلتراسونیک با ۲ درصد وزنی نانو Al2O3 (اندازه متوسط ۱۰ نانومتر) پرداخته و نشان دادند نانوذرات آلومینا بیشتر در داخل دانه پراکنده بوده و مناطق اطراف مرزدانه خالی از این نانوذرات می باشد. کی دو وو و همکاران [35] از HEMM بر روی ذرات آلومینا زیر اندازه زمینه آلومینیوم کامپوزیت تقویت شده استفاده کرد و متوجه شد که مقاومت خمشی نمونه زینتر شده افزایش می یابد. در کل با افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن تا ۰٫۷ درصد وزنی استحکام نانوکامپوزیت افزایش می یابد اما با اضافه کردن بیشتر باعث کاهش استحکام نانوکامپوزیت خواهد شد که دلیل این امر میتواند به کلوخه ای شدن نانوذرات در داخل زمینه نانوکامپوزیت باشد. مقدار بهینه نانو صفحات دی سولفید تنگستن با توجه به اندازه دانه، خواص مکانیکی و تصاویر نوری و الکترونی ۰٫۷ درصد وزنی است. شکل (۹) نتایج تست کشش برای نمونه حاوی ۰٫۳ درصد وزنی دی سولفید تنگستن قبل از عملیات حرارتی را نشان می دهد.



شکل ۸ نتایج خواص استحکامی نانوکامپوزیت های حاوی نانوصفحات دی سولفید تنگستن



شکل ۹ نمودار تست کشش برای نمونه پایه

نتیجه گیری

نتایج زیر از این مطالعه قابل استخراج است:

کار تحقیقاتی حاضر نشان می دهد که روش ریخته‌گری با استفاده از همزن مکانیکی و امواج آلتراسونیک برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانو صفحات دی سولفید تنگستن با آلیاژ زمینه آلومینیوم Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu بسیار مؤثر بوده است. ریخته گری آلتراسونیک به توزیع یکنواخت نانو صفحات دی سولفید تنگستن در زمینه آلومینیومی کمک می کند. امواج آلتراسونیک هنگامی که در زمینه مذاب آلیاژ پایه منتشر می‌شوند، خوشه‌های نانوصفحات را می‌شکنند که منجر به پراکندگی یکنواخت نانوصفحات می‌شود و به همین دلیل خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. با این حال، زمانی که درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن به بیش از ۰٫۷ درصد وزنی برسد. تجمع نانوصفحات دی سولفید تنگستن در مرز دانه‌ها باعث شکنندگی، تخلخل، پیوند سطحی کمتر و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی می‌شود. بهترین خواص مکانیکی برای نمونه نانوگامپوزیت حاوی ۰٫۷ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن بدست آمد. خواص مکانیکی این نمونه ۵۳۵ مگاپاسکال بعد از عملیات پیرسختی میباشد که نسبت به نمونه پایه قبل از عملیات پیرسختی افزایش ۱۵۵ درصدی را داشته است.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] M. Raturi, and A. Bhattacharya, “Electrochemical corrosion of AA6061-AA7075 double sided FSW joints prepared with and without secondary heating,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 38, pp. 590-612, 2022. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.06.002

[2] D. G. Andrade, C. Leitão, N. Dialami, M. Chiumenti, and D. M. Rodrigues, “Modelling torque and temperature in friction stir welding of aluminium alloys,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 182, pp. 105725, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105725

[3] R. Prasad Mahto, and S. Kanta Pal, “Friction Stir Welding of Dissimilar Materials: An Investigation of Microstructure and Nano-Indentation Study,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 55, pp. 103-118, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.050

[4] M. Raturi, and A. Bhattacharya, “Temperature variation and influence on local mechanical properties assessed by nanoindentation in AA6061-AA7075 dissimilar FSW,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 148, pp. 107079, 2023. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107079

[5] X. Yibin, T. Yoshita, “Thermal Conductivity of SiC Fine Particles Reinforced Al Alloy Matrix Composite with Dispersed Particle Size,” *Journal of Applied Physics*, vol. 95, no. 2, pp. 722-726, 2004. https://doi.org/10.1063/1.1632022

[6] C. Borgonovo, D. Apelian, “Manufacture of aluminum nanocomposites: a critical review,” *Materials Science Forum*, vol. 678, pp. 1–22, 2011. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.678.1

[7] L. M. Tham, M. Gupta and L. Cheng, “Effect of Limited Ma-trix-Reinforcement Interfacial Reaction on Enhancing

the Me-chanical Properties of Aluminium-Silicon Carbide Composites," *Acta Materialia*, vol. 49, no. 16, pp. 3243-3253, 2001. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00221-X

[8] M. T. Khorshid, S. A. J. Jahromi, M. M. Moshksar, "Mechanical properties of tri-modal Al matrix composites reinforced by nano- and submicron-sized Al2O3 particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion," *Materials and Design*, vol. 31, no. 8, pp. 3880-3884, 2010. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.047

[9] R. D. Haghighi, S. A. J. Jahromi, A. Moresedgh, M. Tabandeh Khorshid, "A Comparison Between ECAP and Conventional Extrusion for Consolidation of Aluminum Metal Matrix Composite," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 21, pp. 1885-92, 2012. https://doi.org/10.1007/s11665-011-0108-9

[10] J. Schiotz, F. D. Tolla, K. W. Jacobsen, "Softening of nanocrystalline metals at very small grain sizes," *Nature*, vol. 391, no. 6667, pp. 561-563, 1998. https://doi.org/10.1038/35328

[11] T. Varol, A. Canakci, "Synthesis and characterization of nanocrystalline Al 2024–B4C composite powders by mechanical alloying," *Philosophical Magazine Letters*, vol. 93, no. 6, pp. 339-345, 2013. https://doi.org/10.1080/09500839.2013.779758

[12] K.U. Kainer, *Basics of Metal Matrix Composites*, Metal Matrix Composites: Custom- made Materials for Automotive and Aerospace Engineering, pp. 1-54, 2006. https://doi.org/10.1002/3527608117

[13] I.A. Ibrahim, F.A. Mohamed, E.J. Lavernia, "Particulate reinforced metal matrix composites—a review," *Journal of materials science*, vol. 26, pp. 1137–1156, 1991. https://doi.org/10.1007/BF00544448

[14] J.C. Lee, J.P. Ahn, "Control of the interface in SiC/Al composites," *Scripta Materialia*, vol. 41, no. 8, pp. 895–900, 1999. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00227-4

[15] Y. Yang, J. Lan, X. Li, "Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 380, no. 1-2, pp. 378–383, 2004. https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.03.073

[16] X. Li, Y. Yang, "Theoretical and experimental study on ultrasonic dispersion of nanoparticles for strengthening cast Aluminum Alloy A356," *Metallurgical Science and Tecnology*, vol. 26, no. 2, pp. 12–20, 2008.

[17] A. Dorri-Moghadam, B. F. Schultz, J. Ferguson, E. Omrani, P. K. Rohatgi, N. Gupta, "Functional Metal Matrix Composites: Self-lubricating, Self-healing, and Nanocomposites," *JOM*, vol. 66, pp. 872-81, 2014. https://doi.org/10.1007/s11837-014-0948-5

[18] J. Wang, Z. Li, G. Fan, H. Pan, Z. Chen, D. Zhang, "Reinforcement with Tungsten disulfide nanosheets in aluminum matrix composites," *Scripta Mater*, vol. 66, no. 8, pp. 594– 597, 2012. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.012

[19] S. F. Bartolucci, J. Paras, M. A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, N. Koratkar, "Tungsten disulfide/aluminum nanocomposites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 27, pp. 7933– 7937, 2011. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.043

[20] G. Qian, Y. Feng, Y. Chen, F. Mo, Y. Wang, W. Liu, "Effect of WS2 addition on electrical sliding wear behaviors of Cu–graphite–WS2 composites," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 6, pp. 1986-1994, 2015. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63807-9

[21] A. Abbas, S. Huang, "Investigation of severe plastic deformation effects on microstructure and mechanical properties of WS2/AZ91 magnesium metal matrix composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 780, p. 139211,

2020. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139211

[22] M. D. Stoller, S. J. Park, Y. W. Zhu, J. H. An, R. S. Ruoff, "Tungsten disulfide-based ultracapacitors," Nano Lett, vol. 8, pp. 3498– 3502, 2008. https://doi.org/10.1021/nl802558y

[23] J. Lazaro-Nebreda , J. B. Patel , Z. Fan, "Improved degassing efficiency and mechanical properties of A356 aluminium alloy castings by high shear melt conditioning (HSMC) technology," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 294, p. 117146, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117146

[24] S. N. Omenyi, A. W. Neumann, "Thermodynamic aspects of particle engulfment by solidifying melts," *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 9, pp. 3956-3962, 1976. https://doi.org/10.1063/1.323217

[25] M. K. Surappa, P. K. Rohatgi, "Heat diffusivity criterion for the entrapment of particles by a moving solid-liquid interface," *Journal of Materials Science*, vol. 16, pp. 562-564, 1981. https://doi.org/10.1007/BF00738658

[26] M Alipour, S Mirjavadi, MK Besharati Givi, H Razmi, M Emamy, "Effects of Al-5TI-1B master alloy and heat treatment on the microstructure and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5 Cu alloy," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 8-16, 2012.

[27] E. M. Agaliotis, M. R. Rosenberger, A. E. Ares, C. E. Schvezov, "Influence of the Shape of the Particles in the Solidification of Composite Materials," *Procedia Materials Science*, vol. 1, pp. 58-63, 2012. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.008

[28] M. A. Khan, P. k. Rohatgi, "A numerical study of thermal interaction of solidification fronts with spherical particles during solidification of metal-matrix composite materials," *Composites Engineering*, vol. 3, no. 10, pp. 995-1006, 1993. https://doi.org/10.1016/0961-9526(93)90007-7

[29] J. S. Zabinski, M. S. Donley, S. V. Prasad & N. T. McDevitt, "Synthesis and characterization of tungsten disulphide films grown by pulsed-laser deposition," *Journal of Materials Science*, vol. 29, pp. 4834−4839, 1994. https://doi.org/10.1007/BF00356530

[30] J. R. Fleming , N. P. Suh, "The relationship between crack propagation rates and wear rates," *Wear*, vol. 44, no. 1, pp. 57−64, 1977.

[31] J Zhang, AT Alpas, "Delamination wear in ductile materials containing second phase particles," *Materials Science and Engineering A*, vol. 160, no. 1, pp. 25−35, 1993. https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90494-Y

[32] W. Chen,Y. Gao,Y. Wang, H. Li, "Tribological behavior of Si3N4-hBN ceramic materials without lubrication under different test modes," *Tribology Transactions*, vol. 53, no. 6, pp. 787−798, 2010. https://doi.org/10.1080/10402004.2010.486522

[33] M. A. Wen-lin, L. U. Jin-jun, "Effect of surface texture on transfer layer formation and tribological behaviour of copper–graphite composite," *Wear*, vol. 270, no. 3-4, pp. 218−229, 2011.

[34] C. Wu, Y. Wang, L. Zhang, C. Feng, K. Zhou, "The effect of hot extrusion on mechanical and tribological behavior of Ag−Cu/MoS_2 composites," *Tribology Transactions*, vol. 59, no. 2, pp. 1−36, 2015. https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1087077

[35] C. Fan-yan, F. Yi, S. Hao, Z. Xue-bin, C. Jie, C. Nan-nan, "Friction and wear behaviors of Ag/MoS_2/G composite in different atmospheres and at different temperatures," *Tribology Letters*, vol. 47, pp. 139−148, 2012. https://doi.org/10.1007/s11249-012-9970-3